



TITLE:

<大学の研究・動向> ヘリカル系磁場閉じ込め核融合

AUTHOR(S):

大引, 得弘; 水内, 亨; 長崎, 百伸

CITATION:

大引, 得弘 ...[et al]. <大学の研究・動向> ヘリカル系磁場閉じ込め核融合. Cue 1998, 2: 8-14

ISSUE DATE:

1998-12

URL:

<https://doi.org/10.14989/57779>

RIGHT:

ヘリカル系磁場閉じ込め核融合

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門

プラズマエネルギー研究分野

教授 大 引 得 弘

e-mail:obiki@iae.kyoto-u.ac.jp

助教授 水 内 亨

e-mail:t-mizuuchi@iae.kyoto-u.ac.jp

助手 長 崎 百 伸

e-mail:nagasaki@iae.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

核融合エネルギーは、環境に与える影響の少ない次世代のエネルギー源の一つとして期待され開発研究が進められている。将来の核融合炉としては多くの方式が考えられているが、いずれも技術的・経済的に確立されるまでには至っていない。現在、もっとも有望と思われ、かつ精力的に研究が進められているのは、トーラス型磁場により閉じ込められた高温プラズマの核融合反応を利用する方式である。トーラス型磁場閉じ込め方式にも磁場構造の違いによりいくつかの方式があるが、大別すると、トカマク方式とヘリカル方式がある。このうちトカマク方式の実験装置は、これまで数多くの装置が建設され実験が行われてきた。最近ではヨーロッパ連合の大型トカマク実験装置JETにおいて、D-T核融合反応生成実験が行われ、反応出力約18MWのエネルギーを発生させることに成功している。これにより、制御された核融合反応の実験室的実証は達成されたと言える。しかしながら、トカマク方式を最終的な商用炉とするには物理的・技術的に多くの課題が残されており、今後の更なる研究が必要とされる。

この報告では、トカマク方式での問題点を解決しうる方式であり、本学で提案され、これまで研究が続けられてきたヘリカル型実験装置・ヘリオトロンEでのこれまでの研究成果の概要と今後の計画の概要を述べる。なお、実験装置は講座（分野）単位では運転できないので、複数の分野の研究者で課題ごとに分担して共同で研究を進めている。現在の概略の分担内容は、

プラズマ制御：大引研

プラズマ加熱：佐野研

プラズマ計測：近藤研

である。ここでは主に全般的な閉じ込め研究の概要について説明する。加熱・計測などの観点からの成果については引き続き後の号に報告される予定である。

2. ヘリオトロンE実験の概要

2.1. ヘリオトロン型磁場構造の特徴

ヘリカル方式では、トカマク方式と異なり、プラズマを閉じ込めるためにプラズマ中に大電流を流す必要がない。このため外部磁場コイルに超電導コイルを用いることにより、プラズマの定常維持、すなわち炉の定常運転が可能である。ヘリカル方式の一つであるヘリオトロン磁場は、1958年に、故 宇尾光治京都大学名誉教授により提案された磁場配位である。とくに、ヘリカル・ヘリオトロン磁場は、磁場コイルシステムが他の方式に比して簡単である点の一つの優れた特徴である。

ヘリオトロンE装置に用いられているヘリカル・ヘリオトロン磁場は、基本的には、図1に示す

ような、トーラス放電管の周りを $2\kappa = 19$ で巻く間にトーラスの大周を2回まわって閉じる構造をもつヘリカル導体の作る螺旋磁場、ならびに一对のヘルムホルツ・コイルから作られる垂直磁場とで、プラズマを閉じ込める層状構造を持つ一群の磁気面が形成される。この磁気面の特徴は、大きい回転変換と強いシアを有していることで、プラズマの平衡と安定性に優れている。ヘリオトロネ装置の装置諸元を表1に示す。

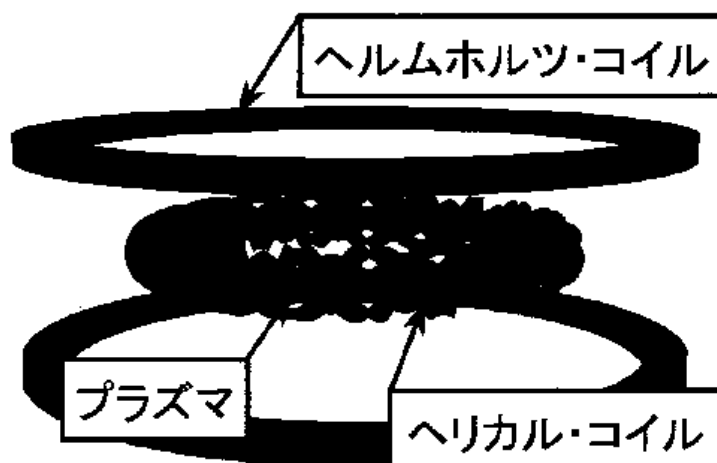


図1 ヘリカルヘリオトロネ磁場を作る基本コイル構成。ヘリカルヘリオトロネ磁場はヘリカルコイルと垂直磁場を作るヘルムホルツコイルとから構成される。

表1 ヘリオトロネE装置諸元

放電管		
大半径	R	2.2m
小半径	a_w	0.21~ 0.41m
閉じ込め磁場最大強度	$B_{h\phi}$	2.0T
ヘリカル導体		
トロイダル回転数	ℓ	2
ポロイダル回転数	κ	9.5
コイル電流	I_H	1.16MA
プラズマ持続時間	Δt	0.5s
電源電力	P_{MG}	330MVA

2.2. 実験課題とこれまでのおもな成果

ヘリオトロネE装置を用いた実験研究は、定常核融合炉への道を開くため、ヘリオトロネ磁場配位による高温高密度プラズマ閉じ込めの原理検証を行うことを目標に開始された。このため、電子サイクロトロン波、中性粒子ビーム入射、イオンサイクロトロン周波数帯高周波を駆使して、無電流プラズマの生成ならびにパラメータ向上を図り、高電子密度、高電子温度、高イオン温度、高ベータ（閉じ込められたプラズマの圧力と閉じ込め磁場の圧力の比）プラズマの実現を試み、その物理を明らかにしてきた。これらの研究により、ヘリオトロネE装置に課せられた目標を達成することができ、世界のヘリカル系核融合研究進展に大きく貢献してきた。さらに、これらの成果は、核融合科学研究所での超伝導大型ヘリカル装置 LHD建設に大きく寄与した。以下では、これまでの

研究における具体的な実験課題とおもな成果を列記する。（詳細については、2年ごとに開催されるIAEA主催の制御熱核融合研究に関する国際会議で報告しており、その発表論文集が、IAEAより発行されているので、参照されたい。）なお、ヘリオトロンE装置で達成された主なプラズマパラメータの最高値は表2のとおりである。

表2 ヘリオトロンEで達成された最高プラズマパラメータ

プラズマパラメータ	最 高 値	加 熱 法
電子密度 (10^{20}m^{-3})	1.8	中性粒子ビーム + ペレット
電子温度 (keV)	3.1	電子サイクロトロン波
イオン温度 (keV)	1.25	中性粒子ビーム
	1.6	イオンサイクロトロン波
平均ベータ値 (%)	2	中性粒子ビーム

2.2.1. ヘリオトロン磁場構造の実験的検証

トラス型磁場閉じ込め方式においては、プラズマ閉じ込めに適した磁場構造を持つことが基本であるが、現実には、様々な要因で生ずる不整磁場により理想的磁場構造が乱され、良好なプラズマ閉じ込めを阻害される可能性がある。ヘリカル方式では、磁場は外部コイルのみによって作られるので、プラズマのない状態での磁場構造、いわゆる真空磁場構造の計測が可能である。不整磁場による擾乱は、磁力線がトラスを周回するに従い積分的に影響が出てくるので非常に小さな不整磁場の値でも問題となることが多い。そのため、空間各点における磁場成分の実測のみでは、十分な情報を得ることはできない。従来、電子ビームを磁場に沿って周回させ、そのビーム位置を検出することを基本原理とする計測方法が用いられてきた。我々は、蛍光材を塗布したメッシュを真空容器内に設置し、電子ビームが、このメッシュに当たることによって生ずる輝点画像を用いて磁気面形状を可視化する「ビーム・蛍光法」を世界に先駆けて実用化した。

一方、最外殻の閉じ込め磁気面の外部領域の磁場構造は、閉じ込められたプラズマの境界条件の一つであり、閉じ込め磁気面同様、実機での検証が重要であるが、この領域では、上記「ビーム・蛍光法」は必ずしも有効ではない。そこで、閉じ込め領域計測用に開発された「ステラレータ・ダイオード法」を元に、新たに「ビーム・インピーダンス法」を開発し、周辺磁場構造を可視化する方法を試みている。

2.2.2. 電子サイクロトロン波による無電流プラズマの生成と加熱制御

ヘリカル方式の特徴は、磁気面を形成するためのプラズマ電流を必要としないことであり、この特徴を生かす高温無電流プラズマ生成法として電子サイクロトロン波の利用がもっとも有効である。ヘリオトロンE装置では、28GHz、35GHz、53GHzおよび106GHz帯のジャイロトロンを用い、基本波、第2高調波の電子サイクロトロン共鳴加熱（ECH）による無電流高温プラズマの生成に世界に先駆けて成功した。

さらに、高電力ミリ波伝送システムや入射システムの開発を進め、電子温度分布制御、プラズマ電流制御、MHD不安定性制御など、ECH技術の新たな応用へ向けての研究に取り組んでいる。図2は、プラズマ電流制御ならびに電子温度制御を目指して最近行われた斜入射ECH実験における106GHz ECHシステム図である。コルゲート導波管を用いた伝送路中には、大電力ミリ波用に新たに開発した波形偏波器を設置し偏波面制御を可能とし、集光光学系の後段に可動鏡を設けることで入射角度を自由に設定できる。

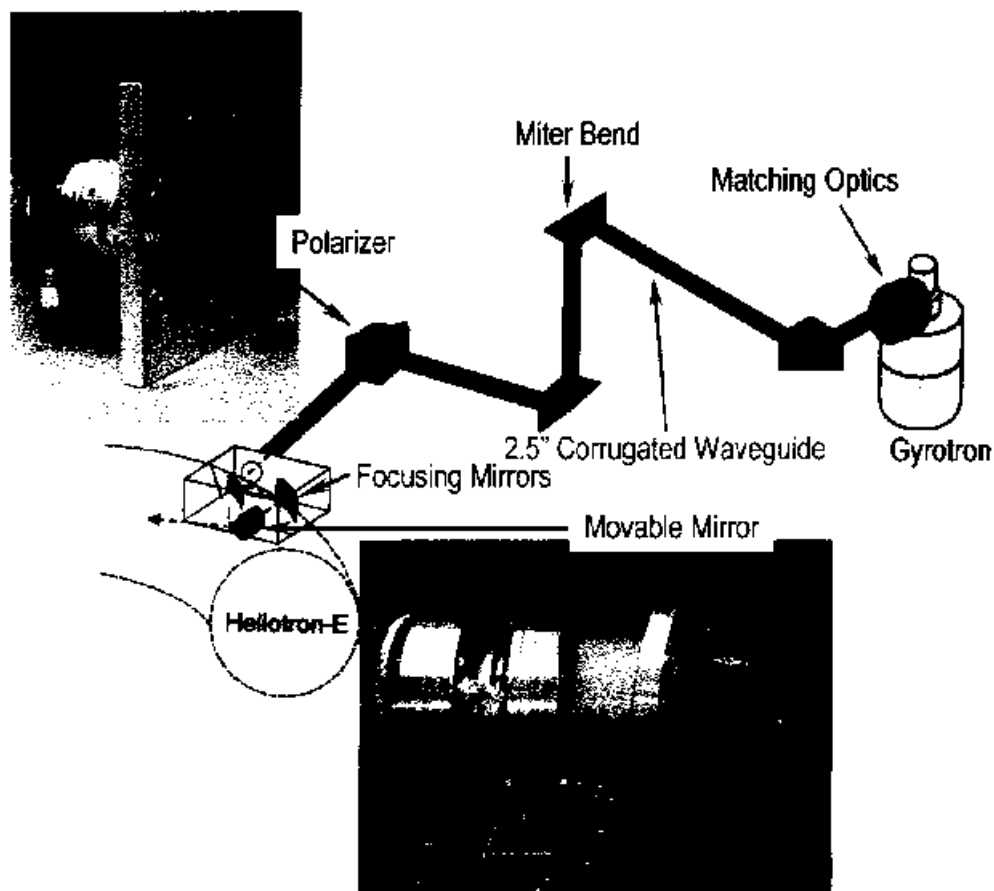


図2 斜入射用106 GHz ECHシステム。図中に挿入してある写真は、高電力ミリ波用偏光器と斜入射用可動ミラーシステムである。

2.2.3. 中性粒子ビーム入射およびイオンサイクロトロン周波数帯波によるプラズマ加熱

核融合反応を効率良く生じさせるためには、イオンを加熱することが必要であるが、このために、中性粒子ビーム（NB）や、イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）波による加熱を試み、高イオン温度の無電流プラズマ閉じ込めを実証した。一方、ヘリカル方式では、磁場のリップルが大きく、とくに粒子間の衝突が少ない高温領域での輸送の研究が重要である。ヘリオトロンE装置では、放電管壁をボロン薄膜でコーティングすることにより不純物発生およびリサイクリングを抑制し、衝突の少ない高イオン温度・低密度プラズマを容易に得られるようになり、理論値との比較研究を進展させることができた。

2.2.4. プラズマ閉じ込め比例則の確立

このように、ヘリオトロンE装置では様々な加熱法によりプラズマ加熱を試み、それぞれ期待された成果を得ることができた。これらのプラズマのエネルギー閉じ込め時間については一つの経験則にまとめられることが明らかになった。この経験則は、他のヘリカル装置であるATF（米）、W7-A（独）、L2（露）、ヘリオトロンDR（京大）にも共通するものであり、LHDスケリングとして核融合科学研究所のLHD装置設計の指針となった。さらに、新たにW7-AS（独）の実験結果を含んだ比例則、ISS95スケリングへと発展した。

2.2.5. プラズマ閉じ込め改善

プラズマ閉じ込め比例則から予測される閉じ込め性能は、現在、トカマク方式での比例則L-modeスケールと同様、核融合炉の実用化には不十分であり、何らかの閉じ込め改善が必要とされる。我々は、(1)磁場配位の最適化、(2)プラズマ分布の最適化、および(3)薄膜作製技術を用いた放電容器内壁の表面改質等により閉じ込め改善を図ってきた。

磁場配位最適化の研究により、磁気軸の内側移動によりヘリカル対称性を回復すると粒子軌道と磁気面とのずれを小さくすることができ閉じ込めが改善されること、しかしこの場合、磁気丘配位となって、プラズマ圧力の上昇に伴ってMHD不安定性が顕著となることが示された。この問題を解決することが、後述する新たな立体磁気軸ヘリオトロン配位への出発点となった。

プラズマ分布制御においては、6連発の水素・重水素ペレット入射装置開発とこれによる密度分布制御、電子サイクロトロン波の入射法の最適化による電子温度分布制御などを可能とし、それらの閉じ込めへの影響が調べられた。プラズマ密度分布制御により、プラズマ中の径方向電場およびその径方向変化の働きによって考えられるイオンの輸送改善（高イオン温度モード）が得られることが示された。

表面改質に関して、我々は、様々な方法を開発してきた。中でも、ECHプラズマを用いた低Z材薄膜コーティング技法を世界ではじめて核融合実験装置に適用し、その有効性を示すことができた。

2.2.6. ヘリカル・ダイバータの開発

核融合炉にとって、ヘリウム灰制御ならびに熱負荷制御を受け持つダイバータは不可欠の技術である。ヘリオトロン磁場では、閉じ込め領域周辺の磁場構造をダイバータ磁力線として利用するヘリカル・ダイバータが構想されてきた。ヘリオトロンE実験では、周辺プラズマの振舞いが詳しく観測され、ヘリカル・ダイバータの可能性を実証するとともに、解決すべき問題点も明確にできた。ヘリオトロンE装置では、装置の制約上十分な排気性能を持つ、真の意味でのヘリカル・ダイバータを実証することはできないが、LHDにおける実証実験に向けての貴重な基礎データを与えることとなった。

2.3. 今後の課題と研究計画

上述のように、ヘリオトロンE装置での研究により、ヘリカル・ヘリオトロン磁場配位が、核融合プラズマ閉じ込め方式として有効であることが実証された。しかしながら、これまでの実験成果を詳細に検討するとき、改善すべき点の多いことに気づく。その中でとくに重要なものは、上で述べたような「良好な高エネルギー粒子閉じ込めとMHD安定性の両立がヘリオトロンE装置では困難であること」である。さらに、従来のヘリカル方式の閉じ込め性能が比例則ISS95で規定される以上、核融合炉実現のためには、何らかの閉じ込め改善が必要である。このため、ヘリカル型磁場の最適化へ向けての研究が、最近世界的に活発になってきている。このような状況のもと、ヘリオトロンE磁場配位では研究できなかった方法、すなわち磁場のミラー成分を積極的に利用して粒子閉じ込めの改善を図り、かつ閉じ込め領域全体にわたる磁気井戸によるMHD安定性向上を図るべく、新たなヘリオトロン磁場配位、 $\ell=1$ ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の研究が開始された。ヘリオトロンE装置以前の装置が平面磁気軸であったのに対し、三次元磁気軸を選択することにより、新たな可能性を広げ、上述の磁場構造最適化方式の実現が可能となる。エネルギー理工学研究所では、この配位を持つ実験装置（ヘリオトロンJ、図3参照）を建設中である。（エネルギー理工学研究所リサーチレポート IAE-RR-98 055、「高度エネルギー機能変換実験装置の研究計画中間報告 - プラ

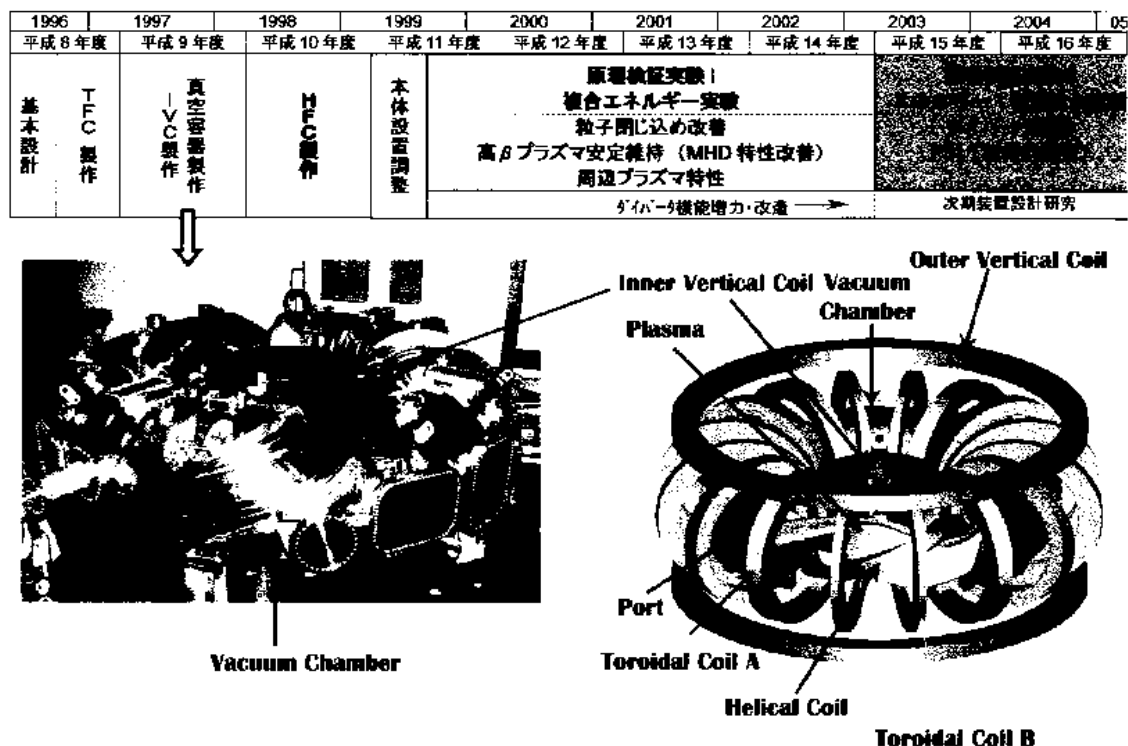


図3 エネルギー理工学研究所で建設中の $\ell = 1$ ヘリカル軸ヘリオトロン装置計画ならびに装置模式図
装置諸元

主半径	1.2m
プラズマ副半径	0.18m
閉じ込め磁場強度	1.0 -1.5T

表3 現在計画中（または最近稼動を開始した）立体磁気軸配位プラズマ実験装置概要

プラズマ装置 （研究所）	W7-AS （NIFS研究施設）	TJ-II （CIEMAT）	H-1NF （Fritz-Haber研究大学）	HX （Fritz-Haber研究大学）	Heliotron-J （京都大学）
スケール・C	2005年頃～	1997年～	1989年～	1989年～	1989年～
モード形式	M=4ヘリカル （低圧高βモード）	M=4ヘリカル （低圧高βモード）	M=3ヘリカル （低圧高βモード）	M=4ヘリカル （低圧高βモード）	M=4ヘリカル （低圧高βモード）
大半径 (m)	6.5	1.5	1.0	1.2	1.2
小半径 (m) (標準)	0.15	0.1 - 0.25	0.22	0.15	0.18
半径 (m)	34	1.43	0.96	0.44	0.82
閉じ込め磁場強度 (T)	3.0	1.0	1.0	1.87	1.0 - 1.5
ベータ値 (%)	< 10	0.5	1.0	0.2	0.5
ベータ値比	10	15 - 6	4.5	8	6 - 8
加熱装置	NBI (0.5 MW) 20 - 30 MW	BCH: 0.6 MW NBI: 4 MW	BCH: 0.3 MW	BCH: 0.2 MW	BCH: 0.4 MW NBI: 1.5 MW ICRF: 2.5 MW
特長・特徴	ヘリカル配位に改良型 HS 電流低減とヘリカル配位の最適化	低圧高β、シフト、高β、高βプラズマ形成の制御が可能 特に高ベータ実験を可能に	低圧高β、シフト、高β、高βプラズマ形成の制御が可能 特に高ベータ実験を可能に	ヘリカル配位の最適化による閉じ込め性能向上に重点を置く	本格的な低圧高βプラズマ形成に有利な閉じ込め磁場配位の最適化を図る
磁場・ポロリティ					

ズマ実験装置の基本設計―」参照) 本装置の建設は順調に進みつつあり、来年秋頃からプラズマ実験が開始される予定である。

表3に、現在計画中あるいは最近稼動を開始した立体磁気軸配位のプラズマ実験装置の概要を示す。ヘリオトロンJは、磁場配位の制御範囲が広いこと、ヘリオトロンEで用いてきた加熱装置が使えるため、プラズマ体積に比して加熱電力が大きいことなどが特徴で、この分野においても、世界をリードする研究ができるものと期待される。

3. おわりに

ヘリオトロンEでの実験結果は、ヘリカル型磁場閉じ込め方式の長所を認識する動機となり、トカマク方式とならんで将来の実用炉候補のひとつとしてヘリカル方式の研究が進められるようになった。周知のように、ヘリオトロンE装置をスケールアップしたLHD装置が文部省核融合科学研究所の主計画としてとりあげられ、第一期の建設が終了し、本年3月から実験が開始された。ヘリカル方式の閉じ込め実験は、トカマク方式に比べて経験が浅く、装置の規模も必ずしも大きくはない。また、上に述べたように、ヘリカル方式磁場構造の最適化の方法論にも多くの種類があり、どのような構造が最適か、それがプラズマ実験装置として、あるいは核融合炉として実際に実現されるか、などの研究が今後さらに必要である。これらの学理的な研究はそれほど大型の実験装置を必要とせず、大学における研究としてふさわしいものであり、学術的な貢献により大型核融合装置の改善に寄与できるものと考えられる。私たちは、これまでのヘリオトロンEを中心とした研究成果を基盤とし、新たにヘリオトロンJを中心とした研究を推進して行くことによって、核融合エネルギー開発に貢献していこうと考えている。